

8

Contribuições incrementais deste trabalho, conclusões e sugestões para trabalhos futuros

O presente trabalho teve como meta primordial apresentar contribuições incrementais para a modelagem matemática de derrame/espalhamento no mar, seguido de incêndio em poça de difusão turbulenta de GNL. Ele foi desenvolvido baseado no estágio mais atual do conhecimento, de 1950 a 2010, sobre esses dois assuntos, possíveis de ocorrer na indústria desse criogênico.

Não foram encontradas evidências de que esses dois temas tivessem sido tratados em único trabalho. Essa lacuna foi identificada, e eles foram conectados de forma inédita, de modo a descrever as fenomenologias dos dois problemas.

Considerou-se que os derrames têm como causa perfurações (acidentais ou intencionais por atos de terrorismo) perpetradas contra navios metaneiros durante colisões com embarcações, no curso de manobras de atracação em um terminal. Adotou-se o cenário de acidente de incêndio em poça, por ser este, fenomenologicamente falando, o mais provável de ocorrer (Sandia, 2008, Luketa-Hanlin, 2006; Sandia, 2004), quando da punção do casco do navio metaneiro, seguida de derrame e combustão não pré-misrturada por difusão turbulenta.

A modelagem do derrame/espalhamento da poça utiliza formulação integral conservativa, com balanço entre a quantidade vazada do navio e a que vaporiza na poça. Levou-se em conta, fundamentalmente, as contribuições dos mecanismos de transferência de calor na interface entre o substrato e o filme de criogênico, e a retroalimentação radiativa proveniente da combustão na região mais baixa da pluma térmica e da própria poça.

Houve falta de informações para se calcular o parâmetro fundamental do escoamento em intervalos diferentes dos valores publicados. Essa dificuldade foi superada com funções contínuas para ajuste. A metodologia para quantificação foi detalhada, e a pesquisa permitiu estabelecer os modelos matemáticos que descrevessem os fenômenos e mecanismos envolvidos. Estabelecidas as formulações matemáticas, as equações necessárias foram implementadas, de forma inédita, em dois códigos computacionais dedicados, permitindo simulações em amplos espectros, atendendo às necessidades da indústria.

Os dados mais completos obtidos até agora para incêndios na água foram com diâmetros de aproximadamente 15 m e volumes derramados de 5,7 m³. Houve testes com diâmetro efetivo de 30 m, mas sem tempo suficiente para desenvolvimento do incêndio, levando a uma aquisição insuficiente e incompleta de dados. Portanto, ainda há grandes lacunas de conhecimento experimental, sendo necessário realizar novos ensaios com diâmetros que possam complementar os dados existentes, como, por exemplo, vazão mássica de vaporização, altura a chama, poder emissivo da superfície, produção de fumaça, características das emissões espectrais, esta última necessária para a determinação da atenuação atmosférica da radiação térmica emitida.

Ainda há dificuldades na determinação experimental da forma física da fuligem, uma vez que as próprias sondas utilizadas para capturar as partículas para análise fotomicroscópica podem causar aglomeração das mesmas ou alterar as características da

fuligem amostrada. Foram apresentados dados de fuligem de experiências em pequena escala para incêndios de propano e óleo cru, não tendo sido identificado nenhum dado direto para grandes incêndios de diferentes combustíveis que tenha sido apresentado até agora, para incêndios com diâmetros acima de 35 m, e que correlacione a formação de fumaça como função do diâmetro.

Houve medições de produção de fumaça em incêndios de petróleo de diferentes diâmetros entre 0,85 m e 17,2 m, expressos como fração mássica percentual do combustível queimado emitida como fumaça, aumentando com o aumento do diâmetro do incêndio. Dados da formação de fumaça de incêndios de GNL não são disponíveis na literatura nem para incêndios de pequenas escalas nem para incêndios de grandes escalas de difusão turbulenta, assim como não são conhecidos coeficientes de extinção para fuligem formada em incêndios de GNL acima de 35 m.

Pesquisou-se e constatou-se que, como se tratava de um incêndio com chama de combustão não pré-misturada turbulenta (ou de difusão turbulenta), este trabalho considerou, por aproximação, que a relação entre frações mássicas das espécies químicas e fração de mistura, poderia ser tratada como quase linear. Isso foi fundamental, e foi estatuído formalmente nas premissas e hipóteses simplificadoras, para concepção do modelo da pluma térmica. Encontrou-se também que a fração mássica dos produtos de combustão poderia, da mesma forma, ser correlacionada linearmente com a temperatura.

Com isso, o problema da modelagem da chama turbulenta não pré-misturada ficou reduzido ao mapeamento (*tracking*) da mistura turbulenta do escalar passivo, tendo como condições de contorno que as espécies químicas e as entalpias fossem consideradas homogêneas. Tendo-se somente o escalar passivo da fração de mistura conservado, como a única variável necessária para a descrição do processo de reação devido à ausência de termo fonte, simplificou de forma significativa o processo de modelagem do incêndio em poça.

Outra constatação importante foi a de que em chamas não pré-misturadas laminares com cinética química rápida, a aproximação linear que correlaciona fração mássica das espécies com o escalar passivo conservado, foi de crucial importância, sendo o pilar fundamental para o modelo de múltiplas zonas. Esta relação linear foi usada em lugar das equações diferenciais parciais exatas de transporte do escalar conservado para chamas não pré-misturadas turbulentas, o que também facilitou, grandemente, o processo de modelagem da pluma de incêndio.

Simulação numérica direta, simulação de grandes escalas e equações de transporte com funções de densidade de probabilidade, foram também pesquisadas, porém, ensejariam elevado esforço computacional. Avaliou-se o real ganho que seria obtido com essas soluções, considerando sua atratividade, tendo em vista o balanço da relação custos vs. esforço computacional vs. benefício alcançável vs. margem das incertezas, e não foi considerado nem atrativo nem custo-eficiente, para este problema.

As seguintes descobertas feitas com este trabalho permitem alinhar:

- A maioria dos modelos atuais de derrame/espalhamento não utiliza formulação integral, aumentando o esforço computacional, uma vez que tratam os fenômenos com métodos numéricos mais precisos, tornando-os superdimensionado para a realidade industrial;
- A formulação integral conservativa aqui desenvolvida dispensa a distinção entre vazamentos instantâneos e contínuos, de acordo com as recomendações da FERC (2004) e do ABS (2004);
- Integra as equações diferenciais parciais da história do escoamento com soluções analíticas e numéricas;

- Trabalha com variáveis adimensionalizadas do tempo, volume, área e escalas de comprimento, simplificando o tratamento do problema e a escrita das equações;
- Expressa a área máxima da poça e o tempo de vaporização em função de um único parâmetro adimensional do escoamento, Y , variando de 0 a $+\infty$, função unicamente das características geométricas do navio, velocidade de vaporização da poça, englobando os processos de transferência de calor por convecção e radiação. Esse parâmetro apresentou uma singularidade, não revelada por Fay (2003) na literatura, por assumir exatamente o mesmo valor nas duas configurações geométricas do navio analisadas, e em todas as oito velocidades de vaporização utilizadas, sugerindo ser universal para as mesmas. Ademais, é designado como 'crítico', e é neste ponto que o tempo de vaporização na poça, praticamente se torna independente da geometria do rasgo no costado e a área da poça cresce mais lentamente, passa por um máximo e de cai monotonicamente. Por outras palavras, este ponto singular pode ser pensado como um corte máximo (*maximum upper bound cut set*), a partir do qual os comportamentos acima passam a ser revelados;
- Utiliza um único parâmetro de forma e espalhamento, β , enfeixando o espalhamento axissimétrico nas linhas de corrente da poça;
- Utiliza poça de formato semicircular, que descreve melhor a fenomenologia do problema, conforme recomendação da FERC (2004) e do ABS (2004);
- A maioria dos modelos para radiação térmica emitida por plumas de incêndio não levam em conta vários efeitos constatados em experimentos de grandes incêndios de GNL. Especificamente, a produção de copiosa quantidade de fumaça absorvedora de radiação térmica, reduzindo a emissão efetiva de intensidade, fazendo-a variar a partir da base do incêndio até o topo, diminuindo seu valor;
- Além das medições do poder emissivo e da fração do combustível convertida em fumaça, são necessárias mais informações para se determinar o obscurecimento da pluma pela fumaça. É necessário se considerar a vazão mássica de vaporização e as características do combustível;
- Embora usando dados de produção de fumaça de petróleo bruto e propriedades óticas do propano, o modelo prediz bem as emissões radiativas para poças de GNL de diferentes tamanhos;
- Embora o modelo da TMS (2006) tenha sido calibrado com os dados das emissões radiantes medidas no teste de 'Montoir', ele consegue capturar a variação do poder emissivo ao longo do eixo, não presente em outros modelos;
- Os modelos atuais de radiação consideram que toda a pluma emite com a mesma intensidade, e não levam em conta a diminuição da transmitância no interior da pluma por absorção de energia radiante pela fumaça. Isso implica em maior poder emissivo da pluma, e maiores predições nas distâncias seguras para recursos humanos e materiais. Maiores emissões acarretam maiores zonas de exclusão e de segurança, podendo comprometer a locação do terminal;
- Outra singularidade importante ocorre com o parâmetro, Ψ , da intermitência estocástica da pluma, não revelada na literatura pela TMS (2006); Como ele é a razão entre os comprimentos das zonas de combustão 'limpa' e o comprimento total da chama 'visível', embute o comprimento da 'intermitente'. Se esta última cresce até se igualar ao comprimento visível, não haverá mais chama limpa, e $\Psi = 0$. Supostamente, se a intermitência crescer, o parâmetro se torna negativo $\Psi < 0$.

Da mesma forma, ele pode ser pensado como um limite inferior a partir do qual não há mais zona de combustão limpa, ou seja, funciona como um limite mínimo (*minimum lower bound cut set*).

Os modelos estudados não são, todavia, uma panacéia. Apresentam limitações, por exemplo:

- O modelo de derrame/espalhamento não considera a pressão de esvaziamento (*ullage pressure*) do tanque do navio, devido à vaporização do criogênico no interior do mesmo, com diminuição da altura manométrica;
- Não considera efeitos exógenos ao espalhamento (marés, correntes marinhas, por exemplo), assim como interações do fluido com estruturas que se interponham ao desenrolar do escoamento da poça no mar;
- Considera águas quiescentes e abrigadas;
- Como modelo semi-empírico que considera aspectos globais da dinâmica dos fluidos dentro do incêndio e do transporte radiativo, conferido pela formulação integral, não captura variações locais importantes. Por exemplo, turbulência, estruturas dos vórtices toroidais formados, distribuição de temperatura, perfis de velocidades e de vazões mássicas de vaporização no interior da pluma, gradientes de concentração, determinadas de forma simplificada neste trabalho;
- Assume que os incêndios se comportam como ‘grandes incêndios’, e que, supostamente, a produção da fumaça e as propriedades óticas variem somente com o diâmetro;
- O modelo do incêndio assume um perfil de similaridade, dado por uma função estocástica de distribuição de probabilidades ponderadas pela escala axial da pluma, ou seja, fração do tempo em que a parte interna da pluma que está queimando pode ser vista fora do envelope.

Em face do exposto, pode-se concluir:

- Os modelos de derrame/espalhamento e de incêndio de difusão turbulenta apresentaram boa capacidade de predição, mostrando estabilidade e nenhuma descontinuidade ao longo de cerca de 300 simulações cobrindo, praticamente, quase todas as possibilidades encontradas pela indústria de GNL, tanto no derrame/espalhamento como na combustão da poça;
- Os modelos se mostraram robustos, simularam todos os fenômenos de interesse, e apresentaram todas as equações necessárias para simular os mecanismos importantes;
- As avaliações das incertezas mostraram a precisão com que os modelos previram valores de parâmetros-chave de interesse, tomando-se por base resultados disponíveis na literatura, obtidos e fundamentados nos experimentos relatados no capítulo 5 (Revisão bibliográfica do estado da arte) e no Apêndice C. Em todas elas, não houve nenhum caso cujo resultado diferisse substancialmente dos valores publicados na literatura, demonstrando consistência nas predições;
- Quando comparados com dados experimentais de medições com radiômetros NAR, para a variação do poder emissivo médio temporal ao longo do eixo da pluma, rastreou bem os experimentos, dadas as incertezas que o processo enfeixa;
- Repetiu com boa margem de incertezas os valores encontrados com os testes realizados com poças de 15 a 35 m;

- Os modelos de derrame/espalhamento e de incêndio em poça revelam avanços sobre os modelos atuais, do ponto de vista da indústria. O primeiro porque promove simplificações no cálculo da área e do tempo de vaporização da poça espalhada, e o segundo por que possibilita dimensionamento de zonas de exclusão e de segurança em base mais compatíveis com a fenomenologia do incêndio de difusão turbulenta.

Como exemplos de algumas sugestões para trabalhos futuros que possam beneficiar a indústria, podem ser mencionados:

- Aperfeiçoamento e melhoria dos códigos computacionais, promovendo a conversão automática de poças semicirculares em circulares;
- Investigar outras correlações e/ou métodos numéricos de integração, para estabelecer correlações mais precisas no cálculo do parâmetro adimensional (fundamental) do escoamento;
- Investigar a necessidade eventual de se introduzir termo de atenuação da inércia da poça por ação do atrito viscoso;
- Investigar as contribuições que a ação do vento possa acarretar no arrasto e na inclinação da chama, com introdução eventual do número de Reynolds nas formulações da pluma;
- Detalhar a obtenção do parâmetro de espalhamento axissimétrico da poça;
- Expandir os resultados do cálculo da radiação emitida, de modo a contemplar como é atenuada pela transmitância da atmosfera participante;
- Da mesma forma, estender os resultados, contemplando como as diversas estruturas e recursos vulneráveis respondem aos níveis de radiação incidentes;
- Incluir o cálculo e a simulação do fator de configuração geométrica para estruturas mais comuns na indústria de GNL.

No campo da pesquisa avançada, menciona-se:

- Apurar a determinação experimental da vazão mássica de vaporização da poça, e, por conseguinte, velocidade de vaporização, parâmetro de extrema sensibilidade na avaliação do diâmetro da poça;
- Melhorar a formulação matemática e a computação da transferência de calor na vaporização da poça (ebulição e radiação) tornando-a mais realista, face às lacunas e dados experimentais;
- Refinar a captura de variações locais importantes no interior da pluma, como, por exemplo, como turbulência, estruturas dos vórtices toroidais formados, distribuição de temperatura, perfis de velocidades e de vazões mássicas de vaporização;
- Aumentar a escala dos volumes dos inventários derramados nos testes de campo, em cerca de 3 ordens de magnitude (10^3) para refletir a escala industrial da realidade;
- Avaliar o custo-benefício em termos de ganhos na diminuição das incertezas ao se adotar balanços de material com abordagem transiente nos métodos numéricos para integração das variáveis de interesse, em detrimento da formulação integral conservativa, que também faz uso de integração numérica;
- Idem, ao se adotar análise por passo de tempo, que capture taxas de vazamento temporais e variações nas propriedades conforme o GNL vai se vaporizando na poça;
- Computar as propriedades termodinâmicas e físico-químicas com a real composição do GNL, ao invés de usar dados de metano puro, como aproximação;
- Usar parâmetros que reflitam condições mais próximas da realidade do vazamento, incluindo a produção de turbulência entre GNL derramado e água;

- Considerar a possibilidade de entrada de água no casco duplo do navio logo após a ruptura, incluindo possível formação de gelo, vácuo e entrada de ar no topo do tanque no espaço vazio deixado com a descarga do GNL pelo furo (*ullage pressure*)